断層破砕帯の力学特性に関する実験について

藍檀オメル1*・H. Kumsar²・太田良巳³・神立晋弥⁴・清田亮二⁴・岩田直樹⁴

¹琉球大学 工学部 (〒903-0213 沖縄県西原町千原1) ²Pamukkale University, Dept. of Geological Engineering, Denizli, Turkey. ³原子力規制庁 技術基盤グループ (〒106-8450 東京都港区六本木1-9-9) ⁴中電技術コンサルタント (〒735-8510 広島市南区出汐2-3-30) *E-mail: aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

断層破砕帯を跨ぐような場所で建設される構造物の施工の際に様々な工学的な問題が生じていることが報告されている.また,そのような場所では大量な湧水とそれに伴う崩壊が見られる.大規模な地下空洞の場合にも同様な事例が報告されている。断層破砕帯の変形係数は周辺岩盤のものに比べ小さいため,上部構造物に応力集中が生じ,亀裂などの発生要因になることもある.さらに,地震学で地震動の推定などの際に断層破砕帯の特性が最も重要なパラメータである.したがって,断層破砕帯の力学特性の把握が大変重要な課題であるが,大型実験の費用が高いため.実験データが少ない.本論文で著者らが今まで行ってきた実験データを整理し、断層破砕帯の力学特性とその評価について記述する.

Key Words : fracture zone, shear zone, fault, mechanical property, friction

1. 序論

一般に地殻の構造的な運動に関係して,地殻を構成 する岩盤は塑性化し,断層破砕帯と呼ばれる力学的に 大変弱い構造体が形成される¹²³⁾.したがって,岩盤中 に断層破砕帯が多数存在し、断層破砕帯を含まない岩 盤はほぼ存在しないであろう.**写真—1**は自然界に正 断層、逆断層および横ずれ断層運動によって形成され た断層破砕帯のいくつかの例を示す.

断層破砕帯の変形・強度特性といった力学特性はそれを囲む周辺岩盤のものに比べ極めて小さく,その評価は大変困難である.断層破砕帯を跨ぐような場所で建設される構造物の施工の際に様々な工学的な問題が生じていることが報告されている.例えば、トンネルの大変形現象として知られている Squeezing 現象は断層破砕帯中に施工する際に見られることが多い.また、そのような場所では大量な湧水とそれに伴う崩壊が発生していることが数多く報告されている.大規模な地下空洞の場合にも同様なことも報告されている.

本論文で断層破砕帯の特性に着目して,既存の実験 データを含めて、著者らが今まで行ってきた実験デー タを整理し、断層破砕帯の力学特性とその評価法につ いて記述する.また,岩盤力学および岩盤工学の立場 から断層破砕帯の特性の評価の可能性を検討する.



写真-1 自然界における断層破砕帯の例

2. 断層破砕帯の特性に関する模型実験

実断層破砕帯は、その規模、方向、破砕幅、各種強 度および断層粘土などの介在物の有無等様々な特性を 持つことから、これを模型化することは非常に困難で ある.ここで図-1 に示したように破砕されていない部 分を母岩、破砕された部分を破砕帯と呼ぶ.さらにそ れぞれの模型材料を母岩材および破砕帯材と呼ぶこと にする.この実験では、図-1の様な破砕帯を模型化し、 破砕帯に各種の幅を持たせ、圧縮および破砕帯のせん 断試験を行なった.

実験では 破砕帯と周辺岩盤の強度比を 1/10 と考え、 さらに破砕帯自身の構成物質が周辺岩 盤の破砕物が混 在したものと考え、母岩を砕いて(破砕材と呼ぶ)各 粒径に分け,一定量を破砕帯材に混合した.



図-1 断層破砕帯の模型実験の概念図²

1) 一軸圧縮実験

図-1(a)に示したような圧縮実験で破砕帯モデルの状況 を変化させて実験を実施した³. ガウジ A は破砕され た母岩部分を含んでいないものに該当しており,ガウ ジ B 材, C 材, D 材, E 材は粒径が異なる破砕された 母岩部分を含んでる断層破砕帯モデルになっている. 図-2(a)に圧縮実験に計測されたひずみ・応力関係を示 した. この図から断層破砕帯内に破砕された母岩が含 入した場合、弾性係数および強度が上昇することが明 らかである.また,圧縮強度と縦波速度の関係を図-2(b)に示した.やはり,断層破砕帯内に破砕された母 岩が含入すると強度および弾性波速度が上昇する.



2) 一面せん断実験

せん断強度および変形特性を調べることを目的とし て、拘束圧を1,1.5 および2 MPa に変化させ各ケース3 個ずつ 実施した. せん断箱の内径寸法は 75 x75x150mm でせん断長さは 150mm であり、拘束荷重お よびせん断荷重の最大荷重は 200kN である。せん断方 向の変位量および拘束方向の変位量は、変位変換器に ようて計測され、載荷荷重と共にコンピュータによって制御する。

モデルの外形寸法は、全ケース同一とし、破砕帯部 の幅を2.5、5.0、10.0、15.0、20.0 mmと破砕帯のみの材 料を用いた 75mmを製作し、せん断 試験を行なった. また、破砕帯部の長さは、モデルの長さの 150mm より 短い 140mm とした. これは、破砕帯部の両端に 5mm の隙間を設けることによ り、せん断箱より破砕帯部に せん断力が直接伝わらないようにするためである.

図-3 は A材, C材別に破砕帯のみ場合と破砕帯幅 15 mm の場合の せん断応力・せん断変位関係を示す.これらの図より各拘束圧における せん断変形係数、最大 せん断強度および残留せん断強度を求めた.図-4(a)は 破砕帯の厚みを変化させて,C材の最大粘着強度および残留粘着強度を示す.一方,図-4(b)は断層破砕帯幅 20 mm にして、母岩部分の粒径を変化させて最大粘着 強度および残留粘着強度の変化を示している.また破 砕帯厚みが増加すると最大および残留強度が増加して いる.一方,粒径の違いによる影響が認められない.

今回行った破砕帯模型実験で破砕帯幅と破砕帯に含 まれる母岩分の粒径を変化させた。今までに得られた 結果より、破砕帯幅が変化しても、その見かけの変形 および強度特性があまり変化しない。また、一定量の 母岩分を含む場合に母岩分の粒径の影響が認められな い.



図-3 せん断変位・せん断応力関係

3. 断層ガウジのせん断特性に関するせん断実験

断層破砕帯のガウジを対象に行った一面せん断試験結 果をこの節で紹介する. せん断強度を求める際に下記 にあてた3つの破壊基準を用いた:



Mohr Coulomb 破壊基準

$$\tau = c + \sigma_{n} \tan \phi \tag{1}$$

Patton⁴, Goldstein et al.⁵の破壊基準

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_a \pm \alpha) \qquad 0 \le \sigma_n \le \sigma_n^* \qquad (2)$$

ここにau: せん断応力; σ_n : 垂直応力; c: 粘着力 ϕ : 摩擦角

Modified Aydan⁶の破壊基準

$$\tau = \sigma_n \left(\tan \phi_i + \left(\tan \phi_\alpha - \tan \phi_i \right) e^{-B_2 \sigma_n} \right) \quad (3)$$

ここに ϕ_i, ϕ_α および B_2 それぞれは最終、初期摩擦角および経験係数。

1) 赤目ヶ谷断層粘土のせん断試験

静岡県静岡市丸子の採石場内で、**写真-2** に見えるように露頭している断層よりガウジを採取した.拘束圧を 100, 200, 300, 400 kPa と設定して一面せん断試験を実施した.得られたせん断強度を拘束圧の関数として図-5 に示す.また,同図に各破壊基準の包絡線を示した.低拘束圧におけるせん断強度を求めるために傾斜試験を用いた.図-5 より、赤目ヶ谷断層粘土の摩擦角は低拘束圧で 10.8°,高い拘束圧で 5.7°であった.



写真-2 赤目ヶ谷断層の露頭の様子



図-5 赤目ヶ谷断層粘土のせん断強度とその包絡線

2) ロ坂本断層ガウジのせん断試験

次に静岡県静岡市ロ坂本付近での断層破砕帯のサン プルを採取した(**写真-3**).この断層は笹山構造線内 にあり、母岩が蛇紋岩で形成されているため破砕帯は 淡い緑色であり路頭している破砕帯は古くから「青べ ト」との通称で呼ばれている.この断層破砕帯は幅が およそ4mである.



写真-3 口坂本断層破砕帯の露頭の様子



拘束圧を 50, 100, 150, 200 kPa と設定して, 一面せ ん断試験を実施した. 得られたせん断強度を拘束圧の 関数として図-6 に示す. また, 同図に各破壊基準の包 絡線を示した. 低拘束圧におけるせん断強度を求める

ために傾斜試験を用いた.図-6より、ロ坂本断層粘土の摩擦角は低拘束圧で45°,高い拘束圧で31°であった.赤目ヶ谷断層粘土と比較すると強度が高いと判断できる.

3) Babadağ断層粘土のせん断試験

写真−4はトルコのBabadağ地区において採取した断層 破砕帯の状況を示している.この地域は長年クリープ 破壊のような挙動示しており、地質は主に石灰質泥岩 と未固結の砂岩層で構成されている.この地域はBuyuk Menderes活断層の南側に位置しており、**写真-4**に示し たように正断層が無数存在している.ここで紹介する 断層粘土サンプルは砂岩層を主体とする断層コア部分 から採集したものである.



写真-4 Babadağ断層破砕帯の露頭の様子

Babadag 断層コアに対して,拘束圧を 50,100,150, 200 kPa と設定して,一面せん断試験を実施した.得ら れたせん断強度を拘束圧の関数として図-7 に示す.ま た,同図に各破壊基準の包絡線を示した.他の実験と 同様に低拘束圧におけるせん断強度を求めるために傾 斜試験を用いた.図-7 より、Babadag 断層コアの摩擦 角は低拘束圧で33°,高い拘束圧で31°であった.



図-7 Babadağ断層コアのせん断強度とその包絡線



図-8 断層破砕帯周辺に存在する産所領域の模式図

4. 岩盤分類による断層破砕帯の力学特性の評価

Aydan et al.⁷は断層破砕帯の周辺に図-8に示したように 不連続面の状況が異なる五つの領域が存在することを 示し、定量的な岩盤分類であるRMQR, RMR, Q-値を 用いて、表-1に示すように点数化した.0領域は断層破 砕帯の影響がみられない岩盤であり、亀裂の発達が認 められない場合、表-1のような点数になる. Aydan et al.⁸はRMQRと岩盤の物性値を求めるため、日本で行わ れた原位置試験のデータに基づいて下記のような経験 式(4)を提案した.

表-1 断層破砕帯周辺の領域の岩盤の各種岩盤分類法による 点数化

岩盤等級	0	Ι	Π	Ш	IV	V
Q-Value	533	79.2	8.33	1.03	0.11	0.0033
RMR	100	89	71	52	31	8
RMQR	100	82	64	43	21	0-5

岩盤の各種物性値の評価式(4)における α_0, α_{100} およ び β の値を**表-2**で与えている.

$$\alpha = \alpha_0 - (\alpha_0 - \alpha_{100}) \frac{RMQR}{RMQR + \beta(100 - RMQR)}$$
(4)

粘土コアの部分が領域Vに該当する.基本的に母岩と 粘土コアのそれぞれの物性値がある場合、各領域ごと の物性値を評価することが可能である.

表-2 岩盤の各種物性値の評価式(4)における α₀, α₁₀₀ お よび β の値

特性(α)	$lpha_{_0}$	$lpha_{_{100}}$	β
変形係数	0.0	1.0	6
Poisson比	2.5	1.0	0.3
一軸圧縮強度	0.0	1.0	6
引張強度	0.0	1.0	6
粘着強度	0.0	1.0	6
摩擦角	0.3	1.0	1.0

5. 針貫入試験による特性の評価の可能性の検討

針貫入試験は日本でSqueezing地山の場合,サンプル が採取しにくい場所で良く利用されている.この手法 を断層破砕帯の粘土コア部分の物性値の評価にAydan et al.⁹がチャレンジしている.その適用例を図-8に示す. 図よりわかるように断層粘土コアの部分をかなり正確 に評価することが可能であることが明らかになった. 近年、沖縄本島西原町南上原地域で道路の拡張工事の 関連で**写真-5** に示すような断層破砕帯が明確に表れた. 最大で相対ずれは 10mに達しており,相対ずれ量が異 なる複数の断層破砕帯が存在している.この現場に針 貫入試験法を適用し、損傷状況の把握の可能性を確認 した.その一例を図-9に示す.



図-9 断層破砕帯の評価に針貫入試験法の適用例8







図-10 南上原地域断層破砕帯に針貫入試験法の適用例

写真-6 に示すようにトルコのカッパドキア地域の Sereflikochisar 町におけるある採石場で逆断層が露頭 している,この露頭から採集した粘土コアの部分につ いて、含水比を変化させて針貫入試験を実施した.そ の結果を図-10 に示す.図よりわかるように針の貫入 量と荷重の関係は含水比によって異なる.この結果から粘土コアの状況と物性値を評価が可能であると判断できる.



写真-6 Sereflikochisar で露頭しているな断層破砕帯



図-11 Sereflikochisarの断層粘土コアの含水比の違いによる貫入量と荷重の関係

6. 桑野藤原地区の破砕帯の特性の実験的検討

対象サイトは愛知県桑野市藤原地区にある鉄塔現場 で、周辺地質は砂岩と頁岩で構成されている. 基礎岩 盤内に存在する断層破砕帯が存在し、行った一連の検 討結果をこの節で報告する. 岩盤は断層運動を受け、 破砕された部分を多く含んでいる. 特に砂岩層に挟ま れた頁岩が激しく破砕され、層に沿ってのせん断変形 を受けている. RMQR 岩盤分類で断層破砕帯の値は 12-18 であった.

コア試料より一軸圧縮試験と3点曲げ試験用に供試体を作成し、一連の力学試験を行った.乾燥状態におけるコア試料の一軸圧縮試験における応力・ひずみ関係を図-11に示す。破砕された頁岩の強度は0.57-0.82 MPaの間に存在した.再度モールドした試料の一軸圧縮試験ももと値の約1/10であった.表-3は平均試験結果を示す.頁岩の一軸圧縮強度(UCS)は120 MPa以上であることを考えると破砕帯の一軸圧縮強度は約1/170である.第5節で紹介した岩盤分類法を適用した場合,得られる結果から断層破砕帯の力学特性が評価が可能であることが判断できる.

表-3 破砕された頁岩の物理力学試験結果

試料	γ	UCS	TS	Е	Vp	
	(kN/m ³)	(kPa)	(kPa)	(MPa)	(km/s)	
コア	19.8	695	179	48	1.71	



図-12 断層破砕帯のコアの圧縮ひずみ・応力関係

10. 結論

本論文で既存の実験データを含めて、著者らが今まで 行ってきた実験データを整理し、断層破砕帯の力学特 性とその評価について述べた.一般的に、断層破砕帯 の周辺岩盤の損傷状況が6つの領域に分けることがで きる. この中で最も弱い部分は領域 V と名付けている 断層コア部分である.しかし、断層コア部分は完全に 粘土化していなくて、周辺岩盤の破片を含んでいる. その状況を考慮して断層破砕帯を模型化し、圧縮およ びせん断試験を実施し、強度・変形特性が異なること を明らかにした. また, 実断層破砕帯粘土コアに着目 し、一面せん断試験を実施し、その強度・変形特性を 求めた. 粘土コア部分を形成された母岩の種類によっ て強度が異なることが判明した. 断層破砕帯の物性値 の評価に Aydan らが提案している RMQR 岩盤分類法を適 用性を検討した. さらに、針貫入試験法を用いて断層 破砕帯の粘土コア部分の物性値の評価の可能性を検討 し、針貫入試験法の利用可能性の極まて高いことが明 らかになった. 最後に紹介した様々な手法を実破砕帯 に適用し,本研究で紹介した手法の適用性の極めて高 いことを示した.

参考文献

- Aydan, Ö., Ito, T., and Ichikawa, Y.: Failure phenomena and strain localization in rock mechanics and rock engineering: A phenomenological description. In Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, edited by Pasamehmetoglu, A.G., Kawamoto, T., Whittaker, B.N. and Aydan, Ö., A.A. Balkama, Rotterdam, 119-128., 1993.
- Aydan, Ö., Y. Shimizu, T. Akagi, T. Kawamoto. Tests for mechanical properties of model fracture zones. *The 1st Asian Rock Mechanics Symposium*, ARMS'96, 643-648., 1997
- Aydan, Ö., R. Kiyota, N. Iwata H. Kumsar, I. Sakamoto. An experimental study on frictional properties of faults. 47th Japan Rock Mechanics Symposium, JSCE, Tokyo, 197-202, 2020.
- Patton, F. D.: Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1st Cong. ISRM, Lisbon, Vol.1, 135-148, 1966.
- Goldstein, M., Goosev, B., Pyrogovsky, N., Tulinov, R., Turovskaya, A.. Investigation of mechanical properties of cracked rock. 1st ISRM Congress, Lisbon, 1, 521-524, 1966.
- Aydan, Ö., Y. Shimizu, T. Kawamoto. The anisotropy of surface morphology and shear strength characteristics of rock discontinuities and its evaluation.*NARMS'96*, 1391-1398, 1966.
- 7) Aydan, Ö., Ulusay, R. & Tokashiki, N.. A new rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Rock Mech Rock Eng* 47: 1255–1276, 2014.
- 8) 藍檀オメル・神立晋弥・太田良巳・坂本泉. 断層破砕帯の 形成とその特徴. 第48回岩盤力学に関するシンポジウム. このシンポジウム, 2022.
- Aydan, Ö., Sato A., Yagi. M.: The Inference of Geo-Mechanical Properties of Soft Rocks and their Degradation from Needle Penetration Tests. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47:1867–1890., 2014.

SOME CONSIDERATIONS ON THE EXPERIMENTAL TECHNIQUES FOR EVALUATING MECHANICAL PROPERTIES OF FAULT/SHEAR ZONES

Ömer AYDAN, Halil KUMSAR, Shinya KODATE, Ryoji KIYOTA and Naoki IWATA

This study is concerned with the utilization of various experimental techniques for their evaluating mechanical properties. Uniaxial compression and direct shear tests on model fault/shear zones have been carried out. Some direct shear tests were performed on the actual fault gouges and their actual characteristics have been evaluated. RMQR rock classification methods is used to evaluate the properties of fault/shear zones. In addition, the Needle Penetration Index (NPI) was introduced for assessing the characteristics of fault/shear core is explored and the results are quite promising. Finaly, the presented procedures and techniques are applied to actual fault/shear zones and they are validated.